영농형 태양광과 농작물 재배

2021.03.18

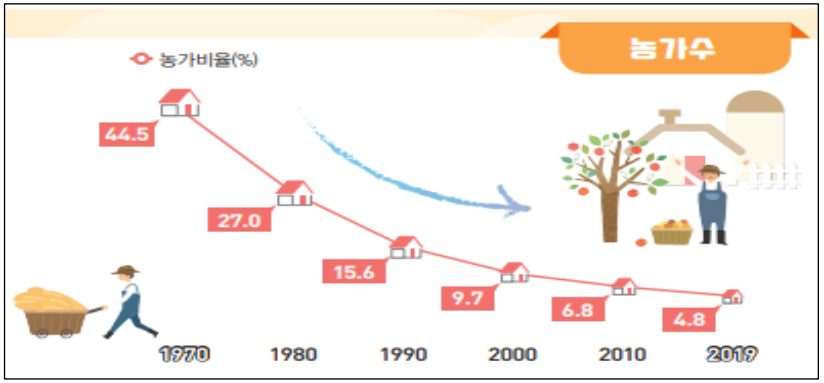
단국대 윤성탁

목 차

1. 한국농촌의 현실
2. 태양광 발전소의 문제점
3. 태양광 발전소의 분류
4. 대안 : 영농형 태양광
5. 국내 실증 및 보급 현황
6. 실증연구 결과
7. 영농형 태양광 극복과제

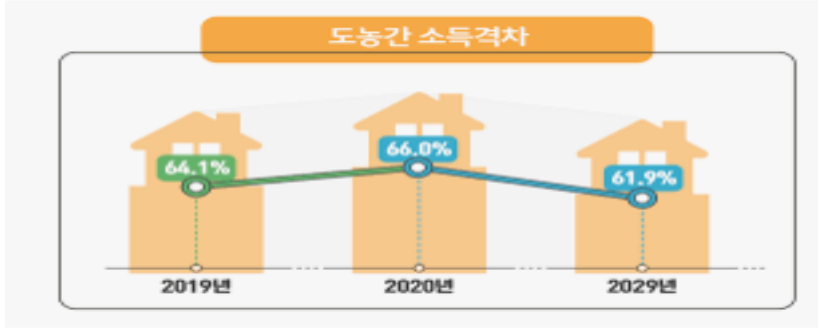
1. 한국농촌의 현실

- **농업인구수 감소**
  - 2019년 전체인구 51,779천명 중 농가인구 비중은 4.3%로 1970년 45.9%에 비해 41.6%p 감소
  - 농가인구는 연평균 3.7% (70~'19)감소



- **농촌인구의 고령화**
  - 1965년 고령화율은 3.2% → 2018년 44.7%로 증가

- **도-농간 소득 격차**
  - 도농 소득격차 심화..."농가소득, 도시근로자가구의 65% 수준
  - 농외소득의 비율은 2003년 35.0%(940만원)에서 2018년 40.3%(1천695만원)로 증가했다.

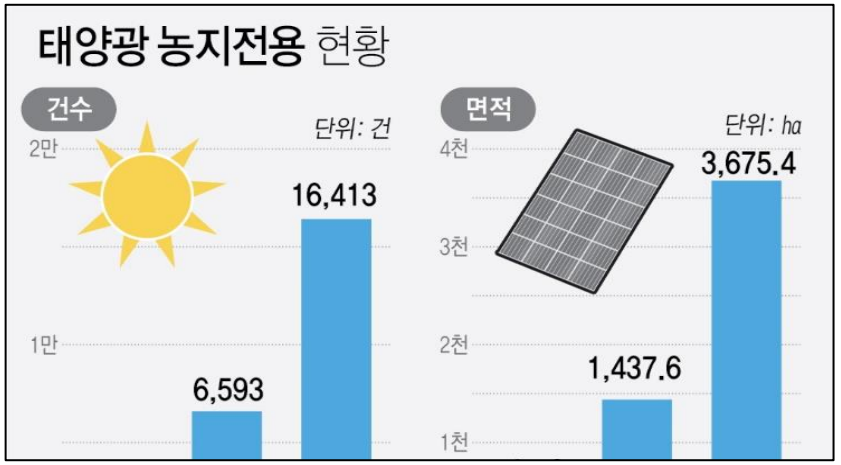


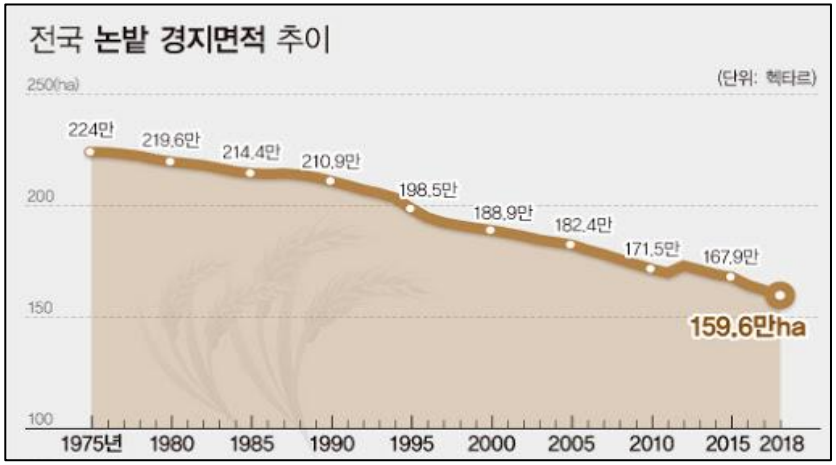
도농 소득격차] 66.0% : 네이버 블로그

2. 태양광 발전소의 문제점

✓ 산사태, 부실시공, 제도 악용
✓ 전기가격 하락에 따른 수익성 악화

✓ 산지 설치 감소로 농지 설치 확대
✓ 지역 갈등 심화, 농지 감소





3. 태양광 발전소의 분류

입지	병행 용도	발전소 명칭
임야	-	-
수상	저수지, 댐	수상형
건물 지붕	건물 용도	지붕형
	축사, 식물재배사	**영농형**
농지	영농 불가	농촌형
	영농 지속	**영농형**

※ 한국영농형태양광협회 자체 분류임.

4. 대안 : 영농형 태양광 !

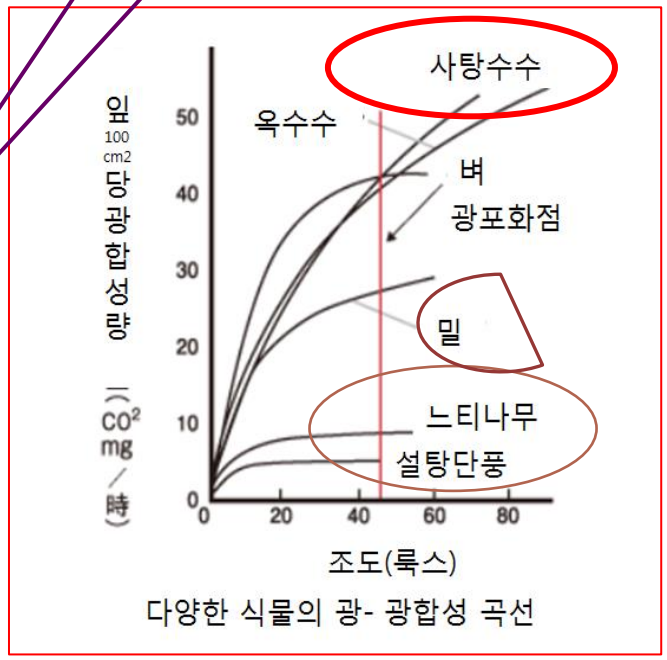
✓ 농지에서 농산물과 전기를 병행 생산

농가소득증대

태양광 발전

+

농작물재 재배



다양한 식물의 광- 광합성 곡선

※ 설명의 편의를 위하여 '일사량' 대신 '조도' 사용
(맑은날 논에 조사되는 평균일사량 :
1일 약 350~400Cal/㎡, 빛의 밝기로는 100~120klux)

5. 국내 실증 및 보급 현황

✓ 농업기술원, 대학, 발전회사 등 다양한 실증 (2016~)
- 전국 약 44개 사이트 (3.2MW, 57개 Type) 설치 운영 중

✓ 농식품부 실증지원, 농촌진흥청 실증 등 정부 직접 참여

설치연도	지역 (업체)	대상 작물	규모 (kW)	구조물 타입	차광률 (%)
2016	충북 (솔라팜)	벼(고시히카리)	15	분산형	29
		배추, 감자	15	분산형	29
2017	경남 (남동발전)	벼 (운광,새누리)	100	분산형	28, 32
	경기도 가평 (한수원)	벼	73	지주형	-
	전남 나주 (녹색에너지연구원)	배추, 마늘	10	분산형	30
	충북 오창 (솔라팜)	참깨, 배추, 무	99	분산형	31.6
	인천 영흥 (남동발전)	포도	99	분산형	30
	전남 나주 (녹색에너지연구원)	배추, 마늘, 양파	99	분산형	28, 30
2018	전남 나주 (녹색에너지연구원)	배	10	분산형	30
		배	10	분산형	30
	전남 순천 (파루)	벼, 보리	100	지주형	-
	충북 청주 (HS솔라)	벼 (찰벼)	98	분산형	25, 30
	경북 군위 (GS건설)-솔라팜	벼	50	분산형	31.5
		콩	50	분산형	31.5
	경기 성남 (해여름)-솔라팜	마늘, 양파 , 쌈채	70	분산형	31.5
2019	전남 영광 (한수원)	옥수수	100	지주형	-
	전남 보성 (개인)-솔라팜	벼	100	분산형	31.6

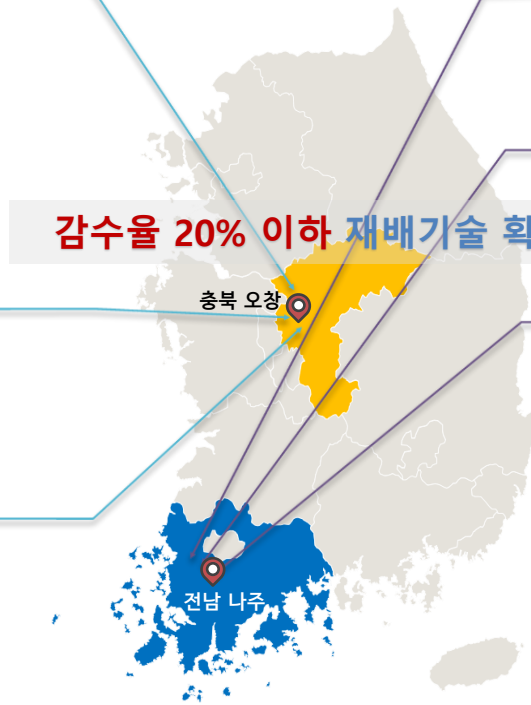
6. 실증연구 결과

✓ 벼, 밭작물, 과수, 녹차 등 다양한 작물 재배
✓ 영농형태양광 농업 충분히 가능 (감수율 20% 이하)

벼 (15kW)
- 감수율 (수량)
  - 조생종 ('17)
  - 추청 ('19)
- 이삭수
  - 조생종 ('17)
  - 추청 ('19)

감자 (15kW)
- 감수율 (수량)
  - 감자 ('17)
  - 감자 ('19)

배추 (15kW)
- 감수율 (수량)
  - 배추 ('17)
  - 배추 ('19)
- 엽수
  - 배추 ('17)
  - 배추 ('19)



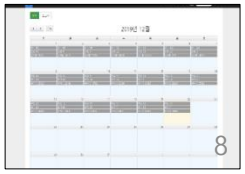
마늘 (10kW)
- 감수율
- 인편직경

양파 (10kW)
- 감수율
- 구근직경

배 (10kW)
- 감수율
- 중량

스마트 영농 시스템 개발

시스템 구성도



6. 실증연구 결과

6.1 작물별 반응

6.1.1 벼 (추청, 일반형)

- 간장, 수장 및 포기당 이삭수는 처리구 및 대조구간 차이가 없었다.
- m^2당 이삭수는 처리구 367.5이삭, 대조구가 412.8이삭으로 처리구가 45.3이삭(9.3%)이 적었다.
- 수당립수, 등숙률 및 1000립중도 처리구 및 대조구간 차이가 인정되지 않았다.
- 수량은 처리구가 498.1kg/10a으로 대조구의 수량 573.5kg/10a에 비해 75.4Kg(13.1%) 감소하였으며 유의성이 인정되었다(표 1).

표 1. 벼의 생육 및 수량 특성 (충북, 오창, 2019)

	간장 (cm)	수장 (cm)	포기당 이삭수	이삭수 /m^2	수당 립수	등숙률 (%)	천립중 (g)	수량 (kg/10a)
대조구	92.66a[z]	16.72a	28.36a	412.75a	72.16a	97.75a	23.65a	573.5a
처리구	98.40a	17.00a	26.50a	367.50a	70.31a	95.75a	23.04a	498.1b
Pr > F	ns[y]	ns	ns	*	ns	ns	ns	**
LSD	10.78	1.86	3.25	23.25	12.45	1.83	0.51	25.24

Z Means with the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD.

[y], *, **, Nonsignificant and significant at p=0.05, 0.01, respectively.

6. 실증연구 결과

6.1.2 감 자 (남작, 일반형)

- 조사된 초장 및 생체중 등 모든 생육특성이 처리구 및 대조구간 유의적인 차이가 없었다.
- 10a 당 상품성수량 및 총수량도 처리구와 대조구간에 유의적인 차이가 없었으며, 10a 당 처리구의 총수량은 2482.6kg, 대조구는 2725.2kg을 나타내었다(표 2).

표 2. 감자의 생육 및 수량 특성 (2019, 충북 오창)

구분	초장 (cm)	줄기수	경직경 (mm)	포기당 괴경수		포기당 괴경중 (g)		괴경수	상품성 수량 (kg/10a)	수량 (kg/10a)
				상품성	비상품성	상품성	비상품성			
대조구	53.87a[y]	14.54a	11.48a	3.00a	2.56a	391.13a	99.48a	5.56a	2117.39	2,725.2a
처리구	54.97a	16.61a	11.39a	3.54a	1.54a	347.10a	100.21a	5.08a	2067.22	2,482.6a
Pr>F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
LSD	6.75	3.13	2.31	0.43	4.47	120.87	72.21/	4.53	252.8	302.46

z: Significant at p = 0.05, 0.01 respectively; ns: non-significant at 0.05 probability level

y: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

6. 실증연구 결과

6.1.3 배 추 (베타후레쉬, 일반형)

- 배추의 생육특성인 지하부중, 배추장, 배추직경 및 엽수 모두 처리구와 대조구 통계적 유의적인이 차이가 없었다.
- 지상부중 및 수량(Kg/10a)도 유의적인 차이가 없었다(표 3).

표 3. 배추의 생육 및 수량 특성 (2019, 충북 오창)

구분	지하부중 (g)	배추장 (cm)	배추직경 (cm)	엽수	지상부중	수량 (kg/10a)
대조구	44.22a[z]	40.55a	18.33a	47.33a	1930.2a	6433.4a
처리구	42.08a	39.57a	16.11a	46.44a	1801.3a	6003.7a
Pr > F	ns[y]	ns	ns	ns	ns	ns
LSD	4.96	5.09	21.68	10.39	547.63	1825.2

z Means with the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD.

y ns, *, **, nonsignificant and significant at p=0.05 respectively.

6. 실증연구 결과

6.1.4 양 파 (카타마루, 일반형)

- 수량특성인 양파 구근직경은 처리구 79.2mm에 비해 대조구가 75.5mm로 처리구가 3.7mm가 감소하였으며, 구근중도 처리구가 236.6g으로 대조구 267.9g에 비해 31.3g(11.7%) 낮았으며, 통계적으로 차이가 인정되었다.

- 10a 당 수량은 처리구와 대조구간 통계적 유의적인 차이를 나타냈다. 처리구가 5913.8kg/10a으로 대조구 6697.2kg/10a에 비해 783.4kg/10a(11,7%) 수량이 낮았다(표 4).

표 4. 양파의 생육 및 수량 특성 (2019, 전남 나주)

구분	초장 (cm)	엽수	구근직경 (mm)	구근중 (g)	상품성 구근수 (bulb/10a)	비상품성 구근수 (bulb/10a)	상품성 구근수량 (kg/10a)	수량 (kg/10a)
대조구	46.29a	6.42a[y]	79.21a	267.88a	19,800.0b	5,200.0a	5811.55	6,697.2a
처리구	42.18a	6.46a	75.50b	236.55b	20,168.6a	4,831.3b	5383.93	5,913.8b
Pr>F	ns	ns	*[z]	**	*	*	*	**
LSD	15.14	1.05	1.65	12.94	217.05	217.05	288.0	323.65

Z : Significant at p = 0.05, 0.01 respectively; ns: non-significant at 0.05 probability level

[y]: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

6. 실증연구 결과

6.1.5 무 (청복플러스, 일반형)

- 무의 길이, 직경, 엽수 및 지상부 중은 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다.
- 지하부중은 처리구가 826g으로 대조구 1121.0g에 비해 295g(26.3%) 낮았으며, 통계적 유의성이 인정되었다.
- 10a당 수량은 처리구 3,561.2kg에 비해 대조구가 4,725.3kg으로 처리구가 1,164.1kg(24.6%) 수량이 낮았으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다(표 5).

표 5. 무의 생육 및 수량 특성 (2019, 충북 오창)

구분	지하부 중 (g)	길이 (cm)	직경 (cm)	엽수	지상부중 (g)	수량 (kg/10a)
대조구	1,121.0a[z]	20.96a	9.01a	19.67a	219.25a	4,725.3a
처리구	826.0a	18.63a	8.89a	19.33a	220.21a	3,561.2a
Pr > F	*	ns[y]	ns	ns	ns	*
LSD	531.2	2.71	2.31	2.80	52.25	1,026.3

zMeans with the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to LSD.

[y]ns, *, **, nonsignificant and significant at p=0.05 respectively.

6. 실증연구 결과

6.2 태양광 모듈별 반응

6.2.1 감 자 (충북, 오창)

(1) 태양광모듈 처리: (대조구), 일반형, 양면형, 투과형

시험포

일반형

양면형

투과형

<그림 1> 태양광 모듈 처리(감자)

(2) 시험품종: 1품종(수미)

(3) 재식거리: 120cm×40cm×35cm

(4) 시험구배치법: 난괴법 3반복

(5) 조사항목: 초장, 줄기수, 경직경, 괴경수, 괴경중, 생체중, 수량 및 일반 성분분석

6. 실증연구 결과

6.2.1 감 자 (생육 및 수량)

- 감자의 초장은 3개 처리구(일반형, 양면형, 투과형)가 평균 43.9cm로 대조구의 41.0cm보다 2.9cm가 컷으며, 유의성이 인정되었다.
- 포기당 상품성 괴경수는 4.9~5.4개의 범위로 유의성이 없었으며, 포기당 총괴경수도 대조구가 7.6개로 가장 많았으나 유의성이 인정되지 않았다.
- 포기당 상품성 괴경중량은 3개 처리구 평균 509.5g에 비해 대조구가 580.2g으로 70.47g 높았다. 처리구별 상품성 괴경중량은 일반형, 양면형 및 투과형의 3개 처리구 중에서는 투과형이 534.3g으로 높았으며 유의성이 인정되었다.
- 포기당 총 괴경중량은 일반형, 양면형 및 투과형의 3개 처리구 평균이 559.0g으로 대조구의 648.0g에 비해 89.0g 낮았으며, 3개 처리구간에는 유의성이 인정되지 않았다.
- 10a당 상품성수량은 일반형, 양면형 및 투과형의 3개 처리구 평균이 2,119.5kg으로 대조구의 2,463.6kg에 비해 344.1kg이 낮았으며, 처리구간에는 차이가 인정되지 않았다(표 6).

6. 실증연구 결과

표 6. 감자 생육 및 수량 특성

구분	초장 (cm)	줄기 수	경직경 (mm)	포기당괴경수		포기당 감자중량(g)		괴경 수	포기당 총 괴경 중량(g)	수 량 (kg/10a)	
				상품성	비상품성	상품성	비상품성			상품성	총수량
대조구	41.0b	13.0a	10.4a	5.4a	2.2a	592.2a	67.8a	7.6a	660.0a	2,463.6a	2,745.6a
일반형	43.6a	13.9a	15.3a	5.0a	2.3a	501.0b	68.4a	7.3a	569.4b	2,084.2b	2,368.7b
양면형	44.2a	14.0a	11.1a	4.9a	1.9ab	493.2b	46.73a	6.8a	539.9b	2,051.7b	2,246.0b
투과형	43.9a	13.8a	11.0a	5.1a	1.3b	534.3ab	33.27a	6.4a	567.6b	2,222.7b	2,361.0b
Pr > F	*	**	NS	NS	*	*	NS	NS	*z	*	*
LSD	2.2996	0.3026	-	-	0.6723	79.595	-	-	109.59	389.5	455.9

z: Significant at p = 0.05, 0.01 respectively; ns: non-significant at 0.05 probability level

y: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

6. 실증연구 결과

※ 고 찰

- 감자의 상품성수량(kg/10a) 및 총수량이 처리구 및 대조구간 통계적으로 유의한 차이가 인정되었으며, 10a당 상품성 수량의 경우 3개 처리구 평균수량은 대조구에 비해 약 14% 감소하였으며, 총수량은 약 16% 감소하였다.
- 처리구간에는 통계적인 차이가 인정되지 않았으나, 상품성 수량의 경우는 투과형이 일반형, 양면형에 비해 약 10% 수량이 높았다.
- 전체적으로 처리구의 수량은 대조구에 비해 14~16% 감소하여 태양광모듈 설치에 따른 일사량 차단이 영향한 것으로 판단된다.
- 작물의 생리적 특성으로 봐서 일사량 감소는 생육에 어떤 경로로든지 부정적인 영향을 줄 수 밖에 없다. 그럼에도 불구하고, 감자의 경우는 내음성 품종 육성 및 선발 등 을 전제하면 태양광발전 병행농업에 적합한 작물로 판단된다.

6. 실증연구 결과

❖ 감자 성분변이

- 단백질 함량은 대조구가 2.64%로 가장 많았으며, 3개 모듈형 평균 1.78% 비해 약 33.0% 함량이 높았다. 처리구간에는 유의적인 차이가 인정되지 않았다.
- 지방함량도 대조구가 0.14%로 가장 높았으며, 3개 모듈형 평균 0.07% 비해 약 50% 함량이 높았다. 처리구별로는 대조구 다음으로 양면형이 0.09%를 나타내었으며, 일반형이 0.02%로 가장 낮았다.
- 탄수화물은 대조구 및 처리구간 차이가 없었으며, 비타민A는 대조구 및 처리구 모두 검출되지 않았다.
- 비타민C는 대조구가 0.11%로 가장 함량이 높았으며, 3개 모듈형 평균 0.04% 비해 약 64% 함량이 높았다. 처리구별로는 양면형과 투과형이 비슷하였으며, 일반형이 0.01%로 가장 함량이 낮았다.
- 칼슘함량은 대조구 및 처리구간 차이가 인정되지 않았으며, 칼륨함량은 대조구가 3.22%로 3개 모듈형 평균 2.52% 비해 약 18% 함량이 높았다. 처리구간에는 일반형이 3.1%로 가장 높았으며 양면형이 2.0%로 가장 낮았다.
- 나트륨 함량은 처리구의 3개 모듈형 평균 0.17%에 비해 대조구의 0.11%가 약 35% 함량이 높았다. 처리구간에는 양면형이 0.14%로 가장 낮았다(표 7)

6. 실증연구 결과

표 7. 감자 성분 함량

구분	수분 (g/100g)	회분 (g/100g)	단백질 (g/100g)	지방 (g/100g)	탄수화물 (g/100g)	비타민A (㎍/100g)	비타민C (㎎/100g)	Ca (㎎ /100g)	K (㎎ /100g)	Na (㎎ /100g)
대조구	79.8a[z]	1.39a	2.64a	0.14a	15.88a	0	0.11a	8.93a	322.0a	11.70d
일반형	80.7a	1.10b	1.87b	0.02c	16.25a	0	0.01c	9.73a	305.3b	19.46a
양면형	81.1a	1.37a	1.69b	0.09b	15.64a	0	0.07b	9.73a	200.0d	14.87c
투과형	80.9a	1.24ab	1.78b	0.06bc	15.95a	0	0.05b	9.74a	252.3c	17.18b
Pr > F	NS	*	**	**	NS	-	*	NS	**	**
LSD	5.09	0.177	0.320	0.031	1.102	0	0.047	1.056	4.830	2.195

6. 실증연구 결과

※ 고 찰

- 감자의 성분분석 결과는 대조구의 단백질, 지방, 비타민C 및 칼륨함량이 처리구에 비해 높았다. 태양광모듈 처리에 의한 일사량 감소가 영양성분 합성에 영향한 것으로 판단된다.
- 상기의 결과가 년차간 반복시험 결과치가 아니어서 일사량 감소에 의한 성분변화인지, 토양특성 차이에 의한 것인지 좀더 많은 연구가 필요하다.

6. 실증연구 결과

6.2.2 배 추 (충북 오창)

(1) 태양광모듈 처리: (대조구), 일반형, 양면형, 투과형

시험포	일반형	양면형	투과형

<그림 2> 태양광 모듈 처리(배추)

(2) 시험품종: 1품종(베타후레쉬)

(3) 재식거리: 120cm×40cm×35cm

(4) 시험구배치법: 난괴법 3반복

(5) 조사항목: 지하부중, 구장, 구폭, 엽수, 구중, 수량(kg/10a)

6. 실증연구 결과

6.1.2 배 추 (생육 및 수량)

- 지하부중 및 구고는 대조구 및 처리구간 통계적으로 유의성이 인정되지 않았다.
- 구폭은 대조구가 17cm로 가장 컷으며, 3개 모듈형 평균 14.5cm 비해 약 25% 컷다. 처리구간에는 대조구 다음으로 일반형이 15.0cm를 나타내었으며, 양면형, 투과형이 가장 작았다.
- 엽수는 대조구가 34.3엽으로 3개 모듈형 평균 29.2엽에 비해 5.1엽이 많았다. 처리구간 엽수는 유의적인 차이가 인정되지 않았다.
- 구중은 대조구가 1,382.9g으로 가장 높았으며 3개 모듈형 평균 1,224.6g 비해 약 11.5% 무거웠다. 처리구간에는 대조구 다음으로 양면형과 투과형이 비슷하게 높았으며, 일반형의 구중이 1,183.0g으로 가장 낮았다.
- 10a당 수량도 대조구가 5,122.0kg으로 가장 높았으며 3개 모듈형 평균 4,535.7kg에 비해 약 11.5% 높았다. 처리구별로는 대조구 다음으로 양면형과 투과형이 비슷하게 높았으며 일반형이 4381.8kg으로 가장 낮았다(표 8).

6. 실증연구 결과

표 8. 배추 생육 및 수량 특성

구 분	지하부	구고(cm)	구폭(cm)	엽수	구중(g)	수 량 (kg/10a)
대조구	42.3a	27.86ab[z]	17.00a	34.33a	1382.87a	5122.0a
일반형	42.0a	28.16ab	15.00ab	29.43b	1183.00c	4381.8c
양면형	44.2a	29.76a	14.23b	28.06b	1219.57b	4517.0b
투과형	43.1a	27.40b	14.30b	30.10b	1271.10b	4708.2b
Pr > F	NS	NS	+	**	**	**
LSD	-	-	2.3912	2.5289	81.498	301.83

6. 실증연구 결과

※ 고 찰

- 배추의 경우 처리구 수량이 대조구의 약 88.5%로서 타 작물(감자, 벼)에 비해 태양광 모듈 설치에 따른 일사량 차단에 의한 영향이 적은 편이었다.
- 단 향후 좀 더 반복적인 시험을 통하여 일사량 감소에 의한 배추의 생육반응을 보다 정밀한 분석 검토가 필요하다.
- 다양한 우수 품종을 공시하여 내음성 품종 선발은 물론 이에 적응하는 품종육성도 필요하다.

6. 실증연구 결과

6.1.3 토양 중금속

- 태양광모듈을 설치한 시험포장의 토양중금속 8종은 대조구 및 처리구 모두 허용기준치 이하였다.
- 태양광모듈을 설치한 3개 모듈형 중금속 8종의 평균 검출량은 대조구와 큰 차이는 없었다(표 9).

표 9. 토양 중금속 함량

구 분	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	납 (Pb)	크롬 (Cr)	6가크롬 ($Cr6^{+}$)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
	---------- (mg/kg) ----------								
대조구	2.06c[y]	0.11c	0.150a	7.07a	36.33a	1.29b	13.50a	15.63a	44.93d
일반형	1.91d	0.20a	0.140a	6.93a	34.03b	1.87a	13.13ab	14.87b	55.13c
양면형	2.68b	0.12c	0.123b	5.64b	31.23c	0.98c	13.00ab	13.30c	57.30b
투과형	3.25a	0.14b	0.136ab	5.24c	30.10c	1.01c	12.23b	12.63d	62.53a
기준[z]	25이하	4이하	4이하	200이하	-	5이하	150이하	100이하	300이하

z: 환경부 토양환경보전법과 농촌진흥청 환경농업육성법 기준

y: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

6. 실증연구 결과

※ 고 찰

- 감자-배추 이모작 재배 밭토양의 태양광모듈을 설치한 처리구와 설치하지 않은 대조구 토양의 비소 등 중금속 8성분을 분석한 결과 8성분 모두 기준치 이하로 검출되어 태양광모듈 설치에 의한 중금속 오염문제는 없는 것으로 판단된다.
- 다만 본 분석결과는 영농형태양광모듈설치 약 2년 6개월 된 토양분석결과로서 영농형 태양광모듈의 내구년한이 20년으로 년차간 토양의 중금속 동태 모니터링이 필요할 것으로 판단된다. (모듈 설치 일자 : 일반형 '18.05.24, 양면형 '18.10.11, 투과형 '19.12.09)
- 각 중금속 모두가 대조구와 처리구 그리고 처리구 내에서도 차이를 보였다. 이는 태양광모듈 설치에 따른 영향이기 보다는 토양 자체의 함유량에 기인된 것으로 판단된다.

7. 영농형 태양광 극복과제

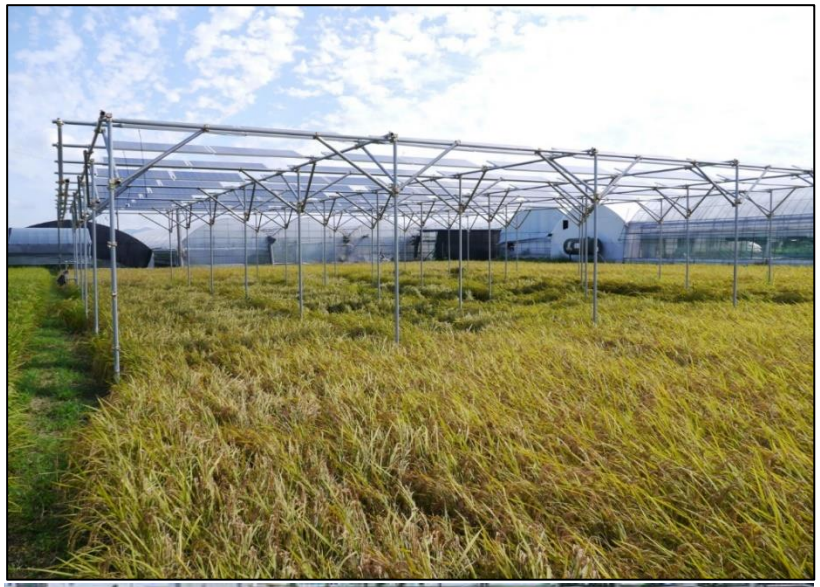
농가 소득 증대
도·농간 소득격차 완화

영농형 태양광
재배기술 확립

태양광 모듈 및 제도	작물·품종 개발	재배기술
▪ 태양광모듈 개선 - 차광률 감소 - 모듈사이즈 - 모듈 배치 형태 - 모듈 가변 장치 - 구조물 높이, 기둥 간격, 면적, 자재 재질 등 ▪ 제도 개선 - 법률 개정, 지자체 조례 개정 - 복잡한 인허가, 부실 업체 - 시설자금 부담 (1.8억원/100kW)	▪ 작물 선발 - 내음성 작물 발굴 - 기후지역별 영농형 적합작물 선발 ▪ 품종개량 - 내음성 품종 육성 » 벼의 경우 연구 - 내도복성 품종 육성 - 고광합성 품종 육성	▪ 농업인 역량강화 교육 ▪ 영농형 태양광 컨설팅 - 병행농업 재배기술 - 낙숫물 처리기술 - 사업설명회 - 교육, 시공절차 컨설팅

7. 영농형 태양광 극복과제

도복



낙수물

감사합니다.